



TITLE:

# ボナーボールを用いたBNCT用中性子照射場の中性子スペクトロメトリに係る検討( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

上田, 治明

---

CITATION:

上田, 治明. ボナーボールを用いたBNCT用中性子照射場の中性子スペクトロメトリに係る検討. 京都大学, 2016, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2016-05-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19897>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により本文は2018-07-14に公開

京都大学	博士（工学）	氏名	上田 治明
論文題目	ボナーボールを用いたBNCT用中性子照射場の中性子スペクトロメトリに係る検討		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、粒子線治療の一種である「硼素中性子捕捉療法(BNCT)」に関する物理学の中で、中性子照射場のエネルギースペクトル評価(スペクトロメトリ)に着目したものである。ボナーボールを用いた中性子スペクトロメトリ手法の改善に関して検討を行い、その成果をまとめたものであり、5章からなっている。</p> <p>第1章は緒論であり、放射線治療におけるBNCTの位置づけ、BNCTの原理および歴史的背景、BNCTにおける品質保証および中性子スペクトロメトリ、等について解説するとともに、本研究の目的を提示している。特に、中性子スペクトロメトリ手法の一つであるボナーボールおよびその問題点について詳細に記述し、本研究の重要性を明確にしている。</p> <p>第2章では、「硼酸水減速材を用いたボナーボールの分解能の改善」について記述している。<math>^{10}\text{B}</math>は <math>1/v</math> (<math>v</math>:中性子速度)に比例した吸収断面積を持つため、熱外や高速中性子の吸収にほとんど影響を及ぼさずに、熱中性子のみの吸収を大きくすることができる。そのため、従来用いられているポリエチレン減速材を用いたボナーボールと比較して、硼酸水減速材を用いることで、特に keV 領域において、エネルギー分解能の改善が期待できる。さらに、減速材を液体にすることにより、主に以下の利点が得られる。</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・ 大きさだけを変える従来のものと比べ、<math>^{10}\text{B}</math> 濃度すなわち硼酸濃度を調整するだけで簡単に応答関数を変化させることができる。</li><li>・ 炭化硼素入りポリエチレン等の固体減速材と比べ、硼酸水減速材を用いれば <math>^{10}\text{B}</math> の減速体中の分布にムラができる問題がなく、等方的な応答を保て、応答関数評価に悪い影響を与えない。</li><li>・ 大きさの異なる容器を用意すれば中身の減速材は転用することができ、固体減速材を用いた場合より経済的である。</li></ul> <p>本章では、まず、扱うボナーボールの構成と各応答関数の詳細を示している。続いて、これらの応答関数を用いて、各減速材を用いた場合のエネルギー分解能比較を行っている。次に、Reginatto の手法および keV 領域に中心を持つ矩形スペクトルのスペクトル評価試験という 2 つの比較方法により、硼酸水減速材を用いることで分解能が改善されることを明確にしている。また、硼酸水減速材ボナーボールの構成の不確かさによるスペクトル評価への影響についても検討を行っている。</p> <p>第3章では、「測定器の組み合わせの検討」について記述している。その中で、ボナーボールで用いる測定器の数に対して得られる情報が多くなる組み合わせの決定手法を提案している。この手法を High Independence Selection (HIS)と名付けている。</p> <p>本章では、まず、HIS の手順について説明している。続いて、多数種類の放射化箔およびボナーボールから BNCT 用中性子照射場の測定に適した組み合わせを決定した</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	上田 治明
<p>結果の例を示している。次に、<b>HIS</b> で得られた組み合わせで測定器の数を変化させ、測定器を追加することによるスペクトル評価の正確度の向上の確認を行っている。これにより、<b>HIS</b> により得られた組み合わせを適用した測定で、全エネルギー領域でスペクトル評価に必要な情報が得られることを確認している。最後に、<b>HIS</b> による組み合わせを用いることで正確度の高いスペクトル評価を行えることを示している。</p> <p>第4章では、「スペクトル評価のための多層ニューラルネットワークの構築およびそのアンフォールディング性能評価」について記述している。少数の測定データでも正確度および精度の高い評価を行えるアンフォールディング手法を提案している。この手法では、中性子スペクトルの深層学習によって中性子スペクトルモデルを生成し、それを組み込んだ多層ニューラルネットワーク(DNN)を構築する。この手法を Expert Training method (ET 法)と名付けている。また、測定データを分析するために構築した DNN を Expert Data Analyzer (EDA)、EDA によるアンフォールディングを UEDA (Unfolding with EDA)と名付けている。</p> <p>本章では、まず、深層学習および ET 法の概要について説明している。続いて、BNCT 用中性子照射場の深層学習を行って得られた EDA のスペクトル評価試験を行い、多様な構成をとる BNCT 用中性子照射場であっても、少数の測定データから正確度および精度の高いスペクトル評価を行えることを示している。最後に、BNCT の臨床研究に利用されている京都大学研究用原子炉・重水中性子照射設備の熱外中性子照射モードスペクトルに対する UEDA の結果から、学習データの想定を超えたスペクトル評価は行えないことを示している。</p> <p>第5章は総括であり、本論文で得られた成果について要約している。本論文の成果を踏まえて、BNCT 用中性子照射場の中性子スペクトロメトリについて、以下の手順を提案している。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 測定器の候補を複数あげる。硼酸水減速材ボナーボールを含むことが望ましい。</li> <li>(2) <b>HIS</b> を行う。</li> <li>(3) 選定結果をもとに <b>EDA</b> を構築する。</li> <li>(4) 実際の BNCT 用中性子照射場での測定によって <b>EDA</b> の入力として与える測定データを得る。</li> <li>(5) <b>UEDA</b> を行う。</li> </ol>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、「硼素中性子捕捉療法(BNCT)」に関する物理工学研究の一環として、中性子照射場のエネルギースペクトロメトリについて、ボナーボールを用いた手法の改善に関する検討を行い、その成果をまとめたものである。得られた主な成果は次のとおりである。

1. 従来のポリエチレン等を用いたボナーボールによる中性子スペクトロメトリでは、エネルギー分解能が悪いという欠点がある。本論文では、硼酸水減速材を用いたボナーボールの利用が提案されている。Reginatto の手法および keV 領域に中心を持つ矩形スペクトルのスペクトル評価試験により、硼酸水を減速材として用いることでエネルギー分解能が向上し、正確度および精度が向上することが明らかにされた。また、スペクトル評価の前に、測定誤差の十分な評価、即発  $\gamma$  線測定法(PGA)等の高精度な手法による硼酸濃度の確認、放射化箔の高精度な配置、等が重要であることが確認された。
2. ボナーボールおよび放射化箔を用いた中性子スペクトロメトリでは、測定器の組み合わせを事前に決定しておく必要がある。測定器が多いほどスペクトル情報が多く得られるが、得られる情報は測定器の数より少ない。本論文では、測定器の数に対して得られる情報がより多くなるような測定器の組み合わせ決定手法”High Independence Selection (HIS)”を開発した。HIS により得られた組み合わせを用いた測定で、全エネルギー領域において評価に必要な情報が得られることが確認された。また、BNCT 用熱外中性子照射場のスペクトル評価試験の比較により、HIS によりスペクトル評価の正確度および精度が向上することが明らかにされた。
3. ボナーボールや放射化箔を用いた中性子スペクトロメトリでは、エネルギー群数に対して測定データ数が少ないため、スペクトルが凸凹になる等の物理的に妥当でないアンフォールディング結果になる可能性がある。本論文では、少数の測定器から良好なスペクトル評価を行うための多層ニューラルネットワークを用いたアンフォールディング手法”Unfolding with Expert Data Analyzer (UEDA)”が開発された。試験データを用いたスペクトル評価試験から、UEDA により HIS で選定した測定器数をさらに減らせることが示された。そして、BNCT 用中性子照射場のスペクトロメトリのために、HIS および UEDA を用いた新たな手順が考案された。

本論文は、BNCT 用中性子照射場のエネルギースペクトロメトリにおけるボナーボールを用いた手法について詳細に検討されており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成28年4月26日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。